

DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE MINIPAINÉIS DE TERRA CRUA TRATADA COM ADITIVOS QUÍMICOS

RÉGIS DE C. FERREIRA¹, WESLEY J. FREIRE²

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo pesquisar o efeito da incorporação ao solo de estabilizantes químicos (cal e cimento) associados ao silicato de sódio. Os tijolos foram moldados e assentados na forma de minipainéis que tiveram suas características físico-mecânicas determinadas em laboratório e seu comportamento tecnicamente avaliado por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos (método acústico do ultra-som). Foram pesquisados um solo arenoso e outro siltoso. Os teores de cimento e cal adicionados foram de 6% e 10% em relação à massa seca do solo, e o teor de silicato de sódio foi de 4% em relação à massa seca de solo-cimento ou solo-cal. Os tijolos foram prensados e colocados em câmara úmida por 7; 28; 56 e 91 dias. Aos 28; 56 e 91 dias, os minipainéis foram submetidos ao ensaio de ultra-som para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, seguido do ensaio de compressão simples. Os melhores resultados, em termos de resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água e propriedades elásticas (módulo dinâmico), foram obtidos pelo solo arenoso adicionado de 10% de aglomerante associado ao silicato de sódio. De forma geral, os resultados sugerem uso promissor do silicato de sódio para a melhoria das propriedades físico-mecânicas relacionadas à resistência e à durabilidade de tijolos de terra crua.

PALAVRAS-CHAVE: tijolos de terra crua, propriedades mecânicas, ultra-som.

PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF SOIL MINI PANELS TREATED WITH CHEMICAL ADDITIVES

ABSTRACT: The aim of this research was to study the effect of chemical additives (lime and Portland cement) associated with sodium silicate on soil in order to obtain compressed soil bricks. Mini panels were constructed with such bricks being their physical and mechanical characteristics determined in laboratory conditions and their behavior evaluated through the association of destructive and non-destructive methods. For this purpose a sandy soil and a finely divided one were added to Portland cement and lime in the dosage of 6% and 10% taken in dry weight basis in relation to the dry soil. The sodium silicate dosage of 4% was also taken in dry weight basis in relation to the dry soil-cement or to the dry soil-lime. The compressed soil bricks were cured in a humidity chamber for 7; 28; 56 and 91 days. The bricks were laid on the fourteenth day to form prismatic mini panels each one with four layers of bricks. After 28; 56 and 91 days the mini panels were submitted to both; ultrasonic and compressive tests to determine its elastic properties (dynamic modulus) and the compressive resistance. The best results in terms of compressive strength, water absorption capacity or dynamic elastic modulus, were reached by the sandy soil added to 10% of Portland cement or lime associated with sodium silicate.

KEYWORDS: compressed soil brick, mechanical properties, ultrasonic method.

¹ Eng^o Agrônomo, Prof. Adjunto, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, UFG, Câmpus Samambaia, s/n, Goiânia - GO, Fone: (0XX62) 521.1534, rcastro@agro.ufg.br

² Prof. Titular, Departamento de Construções Rurais, FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 4-6-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 3-11-2005

INTRODUÇÃO

Já há algum tempo, devido às crises econômica, habitacional e, mais recentemente, energética, pelas quais sofrem, principalmente os países em via de desenvolvimento, os pesquisadores vêm resgatando técnicas e materiais que possam oferecer soluções apropriadas para a construção de moradias de interesse social, urbanos ou rurais. A terra crua, por ser material de grande disponibilidade e baixo custo, vem se mostrando como excelente alternativa técnica e econômica para uso em construções rurais, principalmente sob a forma de tijolos ou blocos prensados e não queimados. Assim, grandes progressos têm sido alcançados com a finalidade de melhorar as características do solo como material de construção, principalmente pelo tratamento com aditivos químicos (cimento, cal, silicato de sódio e cinzas volantes, por exemplo).

Apesar de o cimento Portland ser o aditivo químico mais usado e pesquisado em termos de estabilização de solos como material de construção, outras alternativas a esse produto também vêm sendo pesquisadas há algum tempo, como é o caso da cal (ALCÂNTARA et al., 1995; AMORIM et al., 1996). Cabe ressaltar que os mecanismos de ação desses dois produtos são distintos e que sua escolha vai depender do tipo de solo a ser estabilizado.

O tratamento do solo com álcalis fortes favorece as reações do quartzo com os estabilizadores alcalinos, tais como a cal e o cimento Portland, podendo a resistência inicial ser elevada em 15 a 400% (FREIRE, 1976). O silicato de sódio (Na_2SiO_3), o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e o hidróxido de sódio (NaOH) são álcalis usualmente associados ao cimento com a finalidade de estabilização de solos (FREIDIN & ERELL, 1995).

O Na_2SiO_3 é usado na estabilização de solos principalmente porque reage com os sais solúveis de cálcio em soluções aquosas para formar silicatos de cálcio gelatinosos insolúveis. Os silicatos de cálcio hidratados são agentes cimentantes e melhoram a estabilidade do solo, preenchendo seus vazios e expulsando, conseqüentemente, a água do solo (REN & KAGI, 1995).

O tipo de aditivo químico, a distribuição granulométrica, a classificação do solo e as condições de cura são fatores que influenciam na estabilização e, conseqüentemente, na qualidade dos tijolos prensados de terra crua. A avaliação do grau de estabilização de tijolos prensados de terra crua, adicionada ou não de aditivos, é feita, comumente, por meio de testes físico-mecânicos destrutivos, tais como, ensaios de compressão simples e capacidade de absorção de água.

Além dos testes destrutivos, algumas caracterizações podem ser realizadas por intermédio de testes não-destrutivos. No caso do concreto e da madeira, o método acústico do ultra-som vem sendo utilizado há vários anos para a determinação de diversos parâmetros, tais como resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico.

O método do ultra-som é baseado na introdução de ondas ultra-sônicas por meio de pulsos periódicos em frequências entre 20 e 100 kHz, usando um transdutor (emissor) acoplado à superfície. Após a propagação das ondas por meio do material, as mesmas são coletadas por outro transdutor (receptor). O tempo (μs) decorrido da emissão à recepção é medido, obtendo-se a velocidade (m s^{-1}). Para o caso de tijolos, CULTRONE et al. (2001) afirmaram que a velocidade da onda ou pulso ultra-sônico é influenciada pela sua composição mineralógica, estrutura cristalina, massa específica aparente e umidade. A presença de vazios, fissuras e rachaduras promove queda na velocidade como resultado da absorção e dispersão do pulso ultra-sônico. Uma vez determinada a velocidade, tem-se uma idéia sobre a qualidade, uniformidade e resistência do material (QASRAWI, 2000).

O objetivo deste trabalho foi o de pesquisar o comportamento mecânico de tijolos prensados de terra crua na forma de minipainéis por meio da determinação dos efeitos da incorporação de aditivos químicos (cimento, cal e Na_2SiO_3), dos diferentes períodos de cura e do tipo de solo. Para isso, são usados testes mecânicos destrutivos associados ao teste não-destrutivo do ultra-som.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Materiais da Faculdade de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, ambas da Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

Foram estudados dois tipos de solo, de duas classes texturais distintas, ou seja, um solo de textura granular ($A_{2-4(0)}$) e outro de textura fina ($A_{5(6)}$) (Tabela 1). Foi usado cimento Portland (CPII E 32) e cal cálcica hidratada (CH-I). As características físico-químicas do cimento e da cal seguem a NBR 11578 (ABNT, 1991a) e a NBR 07175 (ABNT, 1992a), respectivamente. A composição química do Na_2SiO_3 apresentou 63% de SiO_2 e 18% de Na_2O e relação sílica:álcali de 3,5:1. Os ensaios de compressão simples foram executados em prensa universal DYNATEST, com dispositivo de controle de carregamento e capacidade máxima de 25.000 kN. Os ensaios acústicos foram realizados em aparelho portátil de ultra-som Steinkamp/BP7, usando transdutor de contato com frequência de emissão do pulso ultra-sônico de 45 kHz.

Os tijolos foram moldados em máquina da marca SOLOTEST, de acionamento manual e capacidade de fabricação de três tijolos por prensagem. Os tijolos foram do tipo II, de acordo com a NBR 08491 (ABNT, 1992b).

Os solos foram submetidos a ensaios de caracterização para determinar seus principais índices físicos, a saber: umidade natural (%); distribuição granulométrica (%) (NBR 07181 - ABNT, 1984a); densidade dos sólidos ($g\ cm^{-3}$) (NBR 07251 - ABNT, 1982); limites de liquidez e plasticidade (%) (NBR 06459 - ABNT, 1984b e NBR 07180 - ABNT, 1984c); massa específica aparente seca máxima ($g\ cm^{-3}$) e umidade ótima de compactação (%) (NBR 07182 - ABNT, 1986).

TABELA 1. Características físico-mecânicas dos solos utilizados.

Índices Físicos*	Solo Granular	Solo Fino
Umidade natural (%)	3,75	17,01
Massa específica dos sólidos ($g\ cm^{-3}$)	2,65	2,90
Limite de liquidez (%)	NP**	44,67
Limite de plasticidade (%)	NP	36,28
Índice de plasticidade (%)	NP	8,39
Distribuição granulométrica (%)		
Pedregulho (>2mm)	0,00	0,00
Areia (0,05 - 2 mm)	68,35	39,35
Silte (0,005 - 0,05 mm)	20,25	30,55
Argila (< 0,005 mm)	11,50	30,10
Porcentagem que passa na peneira 200	33,30	63,80
Compactação Proctor Normal		
0% (nenhuma adição)	1,96	1,60
Massa específica aparente seca 6% de cal	1,91	1,57
máxima 10% de cal	1,83	1,55
($g\ cm^{-3}$) 6% de cimento	1,97	1,62
10% de cimento	1,97	1,61
0% (nenhuma adição)	11,40	25,05
Umidade ótima de 6% de cal	11,67	25,00
compactação 10% de cal	13,15	26,60
(%) 6% de cimento	11,14	24,49
10% de cimento	11,13	22,95
Descrição visual do solo	Areia siltosa	Silte areno-argiloso
Classificação Bureau of Public Roads	Arenoso	Siltoso
Classificação AASHTO	$A_{2-4(0)}$	$A_{5(6)}$
Classificação USAD	Franco-arenoso	Franco-argiloso

* Resultados de três repetições; ** Não-plástico

Para a realização desta pesquisa, foram estudados os tratamentos relacionados na Tabela 2. Os teores de 6% de cal e 6% de cimento foram escolhidos em razão das recomendações de SHERWOOD (1993), que define o teor mínimo de 4% de estabilizante para a estabilização química de solos. De acordo com o autor, para teores menores que 4%, o termo “solo estabilizado” torna-se inadequado, devendo ser adotado o termo “solo melhorado”. Os teores de 10% de cal e 10% de cimento foram escolhidos em função das recomendações de ROLIM et al. (1999). A adição de 4% de silicato de sódio associado aos teores de cal e cimento baseou-se nas recomendações de RUFF & DAVIDSON (1961) e FREIRE (1976).

Embora o cimento não seja o estabilizante mais indicado para o tratamento de solos finos e, por sua vez, a cal não seja o aditivo mais recomendado para a estabilização de solos granulares, optou-se em repetir os mesmos tratamentos para ambos os solos. Assim, procurou-se comparar os efeitos da incorporação do silicato de sódio associado ao cimento e à cal sobre o desempenho físico-mecânico dos dois tipos de solos estudados.

TABELA 2. Tratamentos estudados.

Solo Arenoso	Solo Siltoso
T1 - solo sem adições (testemunha);	T10 - solo, sem adições (testemunha);
T2 - solo + 6% de cimento;	T11 - solo + 6% de cimento;
T3 - solo + 10% de cimento;	T12 - solo + 10% de cimento;
T4 - solo + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio;	T13 - solo + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio;
T5 - solo + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio;	T14 - solo + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio;
T6 - solo + 6% de cal;	T15 - solo + 6% de cal;
T7 - solo + 10% de cal;	T16 - solo + 10% de cal;
T8 - solo + 6% de cal + 4% de silicato de sódio;	T17 - solo + 6% de cal + 4% de silicato de sódio;
T9 - solo + 10% de cal + 4% de silicato de sódio;	T18 - solo + 10% de cal + 4% de silicato de sódio.

Os teores de cimento e cal (6% e 10%) foram adicionados em relação à massa do solo seco. O Na_2SiO_3 (4%) foi tomado em relação à massa seca da mistura solo-aditivo (cal ou cimento) e diluído na água de amassamento. A quantidade da água de amassamento correspondeu à diferença entre os teores das umidades ótima e natural do solo.

Os tijolos referentes a cada tratamento foram moldados de acordo com a norma NBR 10832 (ABNT, 1989) e levados à câmara úmida por 14 dias sob temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $90 \pm 2\%$. Os minipainéis foram obtidos por meio do assentamento de quatro fiadas de tijolos, sendo cada fiada constituída de um tijolo, de acordo com FERREIRA & MORENO JÚNIOR (1997). As juntas de assentamento tiveram a espessura constante de aproximadamente 1 cm.

Para evitar os efeitos da fissuração, foi empregada argamassa de assentamento composta de cimento, cal e solo (arenoso), no traço 1:1:5, com base nas recomendações de NASCIMENTO & HELENE (1993).

O assentamento dos tijolos foi realizado aos 14 dias após sua moldagem. Para a preparação da argamassa de assentamento, foi utilizada argamassadeira mecânica.

Uma vez confeccionados, os minipainéis foram levados à câmara úmida sob condições de temperatura e umidade anteriormente descritas. Os minipainéis permaneceram na câmara úmida por períodos de 28; 56 e 91 dias, quando, então, foram submetidos aos ensaios de ultra-som e compressão simples.

Com a finalidade de caracterizar a argamassa de assentamento, foram seguidos os procedimentos descritos pela NBR 07215 (ABNT, 1991b), que trata dos ensaios de consistência (flow-table) e compressão simples de argamassas de cimento Portland. O ensaio preliminar de consistência normal foi realizado com o intuito de determinar a quantidade da água de amassamento para argamassa de

consistência normal, por meio da determinação do índice de consistência normal. Com a finalidade de trabalhar com argamassa de consistência normal, foi usada relação água/aglomerante de 0,82.

Foi também determinada a resistência à compressão simples da argamassa de assentamento, procedendo-se à confecção de corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro de 100 mm de altura, de acordo com a NBR 07215. Após a moldagem, corpos-de-prova de argamassa foram curados em câmara úmida e rompidos após os períodos de 14; 42 e 77 dias (Figura 1). Essa diferença de 14 dias foi adotada a fim de garantir as mesmas idades de ruptura dos corpos-de-prova de argamassa com as idades de ruptura da argamassa de assentamento contida nos minipainéis. Tal procedimento foi necessário em razão de os minipainéis terem sido assentados aos 14 dias.

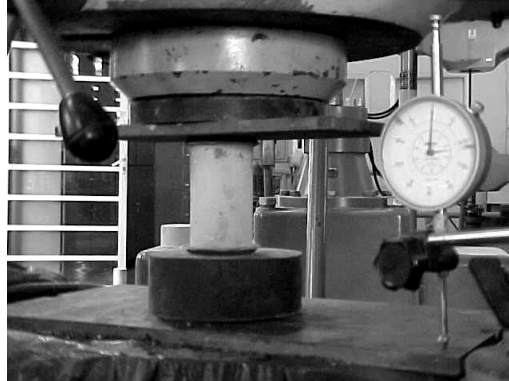


FIGURA 1. Corpos-de-prova de argamassa sob compressão simples.

Teste de ultra-som

Após cada período de cura, os minipainéis foram imersos em água durante 4 h e submetidos aos testes de ultra-som antes de serem submetidos ao ensaio de compressão simples. O tempo de propagação do pulso ultra-sônico (t , em μs) foi determinado por intermédio do aparelho portátil de ultra-som. Uma vez conhecida a distância percorrida pelo pulso (d , em mm), a velocidade da onda (v , em m s^{-1}) foi calculada pela eq.(1) (QASRAWI, 2000).

$$v = \frac{d}{t} 1000 \quad (1)$$

Propriedades físico-mecânicas

Após os testes de ultra-som, os minipainéis foram submetidos aos ensaios de compressão simples (Figura 2), de acordo com a ASTM C-1338 (1997), que dispõe sobre o ensaio em laboratório de resistência à compressão simples de prismas de alvenaria. A resistência à compressão simples (R_c , em MPa) foi obtida pela relação entre a carga máxima (C , em kgf) aplicada a uma área (A , em cm^2), por meio da eq.(2).

$$R_c = \frac{0,1 C}{A} \quad (2)$$

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 08492 (ABNT, 1992c). Os tijolos foram levados à estufa, entre 105 °C e 110 °C, até constância de massa, obtendo-se assim a massa do tijolo seco em estufa (M_1), em g. Em seguida, os tijolos foram imersos em água durante 24 h. Após esse período, os tijolos foram retirados, enxugados superficialmente e

novamente pesados, anotando-se sua massa saturada (M_2), em g. Os valores individuais de absorção de água (A), em porcentagem, foram obtidos pela eq.(3).

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100 \quad (3)$$



FIGURA 2. Minipainel submetido à compressão simples.

Propriedades elásticas

As propriedades elásticas dos minipainéis foram analisadas por meio do módulo de elasticidade dinâmico (E_d , em MPa). Esse parâmetro foi obtido para cada período de cura, mediante a orientação do *American Society for Testing Materials*, pelo método de ensaio C-1597 - “Pulse Velocity Through Concrete” (ASTM, 1983), citado por HAMASSAKI (1987). Esse método relaciona a velocidade de ondas ultra-sônicas num sólido (v , em $m\ s^{-1}$), com a massa específica aparente (ρ , em $kg\ m^{-3}$) [eq.(4)].

$$E_d = \rho v^2 10^{-6} \quad (4)$$

Microcaracterização

Foi usada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de observar a influência do silicato de sódio sobre a estrutura cristalina dos solos estabilizados. Acoplada à aquisição da imagem, foi realizada a análise dos elementos presentes na mistura solo-aditivo por meio da espectrometria de dispersão de energia (EDS). Essas análises foram realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP. Para tal, foram coletadas amostras dos minipainéis logo após sua ruptura, aos 91 dias de idade. Foram escolhidos somente dois tratamentos para serem analisados: a) o que proporcionou o melhor desempenho físico-mecânico em termos de resistência à compressão simples e absorção de água, ou seja, mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento associado ao silicato de sódio), e b) a mistura T3 (solo arenoso + 10% de cimento), nesse caso considerada testemunha da mistura T5, ou seja, sem adição de silicato de sódio.

Primeiramente, as amostras foram secas em lâminas de vidro, sendo, logo após, submetidas a um processo de metalização em ouro/paládio na proporção de 80:20, pela técnica “sputtering”. As imagens foram obtidas por um microscópio eletrônico marca e modelo Jeol JSM - 6360 LV, e a análise de EDS foi realizada pelo equipamento Jeol JSM - TM 300.

Planejamento experimental

O trabalho foi delineado em esquema fatorial ($2 \times 9 \times 3$), inteiramente casualizado, com três repetições, correspondentes aos seguintes fatores de variação: dois tipos de solos (arenoso e siltoso), nove tipos de mistura solo-aditivo (solos sem adições; solos com 6% e 10% de cimento; solos com 6% e 10% de cimento associados a 4% de silicato de sódio; solos com 6% e 10% de cal; solos com 6% e

10% de cal associados a 4% de silicato de sódio) e três períodos de cura (28; 56 e 91 dias). Os resultados das variáveis-resposta resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água e módulo de elasticidade dinâmico foram interpretados por análise de variância. As médias dos valores obtidos foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de resistência à compressão simples dos minipainéis aumentaram com o acréscimo do teor de aglomerante (Tabela 3). O maior valor médio de resistência foi de 6,06 MPa obtido para o solo arenoso com a adição de 10% de cimento associada a 4% de Na_2SiO_3 , aos 91 dias de cura. Em geral, observou-se ganho de resistência ao longo do tempo para todos os tratamentos. Independentemente do tipo de solo, a incorporação do Na_2SiO_3 aos teores de 6% e 10% de cimento e cal promoveu ótimos ganhos de resistência à compressão simples se comparados aos valores de resistência dos tratamentos sem Na_2SiO_3 .

TABELA 3. Resistência à compressão simples e absorção de água.

Trat.	Resistência à Compressão Simples (MPa)*						Absorção de Água*	
	28 dias		56 dias		91 dias		7 dias	
T1	1,02 ± 0,11 (11,28)	ef A	0,58 ± 0,06 (10,41)	h B	1,03 ± 0,02 (1,92)	ij A	-	
T2	0,67 ± 0,08 (11,94)	ef A	0,95 ± 0,13 (13,66)	h A	1,29 ± 0,06 (4,68)	hij A	11,86 ± 0,08 (0,65)	a
T3	1,23 ± 0,01 (0,74)	de B	1,59 ± 0,06 (3,79)	g AB	1,90 ± 0,14 (7,51)	fgh A	11,53 ± 0,14 (1,24)	a
T4	1,76 ± 0,20 (1,40)	cd C	2,93 ± 0,47 (15,87)	cd B	3,91 ± 0,26 (6,62)	c A	14,43 ± 0,11 (0,74)	c
T5	2,54 ± 0,16 (6,28)	b C	5,45 ± 0,48 (8,79)	a B	6,06 ± 0,41 (6,79)	a A	13,84 ± 0,26 (1,85)	bc
T6	0,57 ± 0,01 (1,07)	f A	0,61 ± 0,06 (9,96)	h A	0,88 ± 0,01 (1,30)	j A	13,79 ± 0,33 (2,42)	bc
T7	1,04 ± 0,07 (6,46)	ef B	1,76 ± 0,11 (6,26)	g A	1,84 ± 0,15 (8,40)	fgh A	13,40 ± 0,19 (1,25)	b
T8	1,23 ± 0,16 (2,87)	de C	3,23 ± 0,41 (12,56)	c B	4,45 ± 0,41 (9,12)	bc A	15,43 ± 0,19 (1,25)	d
T9	3,58 ± 0,40 (1,09)	a B	4,33 ± 0,24 (5,57)	b A	4,74 ± 0,69 (14,49)	b A	16,06 ± 0,11 (0,66)	d
T10	2,11 ± 0,00 (0,00)	bc B	2,50 ± 0,02 (0,91)	de AB	2,60 ± 0,13 (5,17)	de A	-	
T11	2,01 ± 0,12 (6,01)	bc A	2,04 ± 0,11 (5,41)	efg A	1,67 ± 0,13 (7,59)	gh A	26,09 ± 0,11 (0,43)	h
T12	2,14 ± 0,18 (8,38)	bc AB	2,42 ± 0,21 (8,82)	def A	1,96 ± 0,10 (5,34)	fg B	25,21 ± 0,03 (0,10)	g
T13	1,38 ± 0,10 (7,14)	de C	2,00 ± 0,09 (4,54)	efg B	2,82 ± 0,33 (11,76)	de A	23,72 ± 0,07 (0,31)	f
T14	1,58 ± 0,17 (10,83)	cde B	3,41 ± 0,22 (6,59)	c A	3,19 ± 0,22 (6,83)	d A	19,97 ± 0,61 (3,05)	e
T15	0,97 ± 0,09 (8,90)	ef B	1,62 ± 0,12 (7,42)	g A	1,44 ± 0,13 (8,85)	ghij A	26,01 ± 0,36 (1,39)	gh
T16	1,02 ± 0,06 (5,59)	ef B	1,80 ± 0,09 (5,04)	fg A	1,65 ± 0,11 (6,93)	ghi A	27,09 ± 0,58 (2,15)	i
T17	0,99 ± 0,07 (6,93)	ef B	2,21 ± 0,10 (4,72)	efg A	2,33 ± 0,21 (8,81)	ef A	25,70 ± 0,52 (2,01)	gh
T18	1,81 ± 0,08 (4,56)	cd B	2,97 ± 0,27 (8,93)	cd A	3,11 ± 0,11 (3,67)	d A	23,50 ± 0,11 (0,48)	f

*Valores médios ± desvio-padrão (coeficiente de variação). Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em termos de capacidade de absorção de água, todos os tratamentos aplicados aos tijolos arenosos atenderam às especificações da NBR 08492, que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22%. Entretanto, para o solo siltoso, somente a adição de 10% de cimento e Na_2SiO_3 atendeu às especificações da NBR 08492. A principal explicação para esse comportamento é a alta porosidade dos tijolos siltosos, principalmente se tratados com a cal, o que sugere outras estratégias de tratamento dos tijolos, como a impregnação e/ou adição de produtos hidrofugantes, como os estudados por REN & KAGI (1995). De acordo com esses autores, a adição de soluções de silicato de sódio, silicone e siloxane reduziu consideravelmente a absorção de água de tijolos moldados a partir de solos finos.

Os maiores incrementos de resistência à compressão simples foram obtidos pela incorporação de Na_2SiO_3 ao solo arenoso, conforme observado por FREIRE (1976) (Tabela 4). Tal comportamento se

deve pela maior presença da fase SiO_2 no solo arenoso, o qual se torna ativa ao ser misturada a álcalis fortes, tais como NaOH , Na_2CO_3 e Na_2SiO_3 (FREIDIN & ERELL, 1995). O cálcio livre, proveniente das reações de hidratação da cal e do cimento, reage com o Na_2SiO_3 adicionado ao solo, dando origem aos silicatos de cálcio hidratados. Tais compostos, de ação cimentante e de comportamento pozolânico, são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e melhor desempenho frente à ação da água dos tijolos prensados de terra crua.

TABELA 4. Ganho de resistência mecânica pela incorporação de silicato de sódio.

Solo	Teor de Aglomerante		Ganho de Resistência (%)		
			28 dias	56 dias	91 dias
Arenoso	Cimento	6%	162,69	208,42	203,10
		10%	106,00	246,77	218,95
	Cal	6%	115,79	429,51	405,68
		10%	244,23	146,02	157,61
Siltoso	Cimento	6%	-31,34	-1,96	68,86
		10%	-26,17	40,00	62,00
	Cal	6%	2,06	36,42	61,81
		10%	77,45	65,00	88,48

A incorporação do silicato de sódio associado ao cimento no solo siltoso foi a que promoveu os menores valores de ganhos de resistência (Tabela 4). Tal resultado pode ser atribuído à maior superfície específica desse solo associada à menor presença da fase SiO_2 e teor de cálcio livre durante o processo de hidratação do cimento.

Na Tabela 5, apresentam-se os valores de massa específica aparente e de velocidade de propagação da onda ultra-sônica dos minipainéis para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico. No caso do solo siltoso, os valores da massa específica aparente e da velocidade de propagação da onda ultra-sônica foram bem menores que aqueles medidos para o solo arenoso (Tabela 5). Dessa forma, os valores do módulo de elasticidade dinâmico dos minipainéis siltosos foram notadamente bem inferiores aos dos arenosos (Tabela 6). Os valores do módulo de elasticidade dinâmico tenderam a aumentar com o período de cura. Assim como observado para a resistência à compressão simples, os maiores valores do módulo de elasticidade dinâmico foram obtidos para os teores de 6% e 10% de cimento associados ao Na_2SiO_3 (Tabela 6). O maior valor foi de 11.207,94 MPa, aos 91 dias, para o solo arenoso com 10% de cal associada ao Na_2SiO_3 .

À medida que se executava o carregamento durante os ensaios de compressão simples dos minipainéis, as primeiras fissuras originavam-se na argamassa de assentamento e tendiam a se propagar horizontalmente ao longo dessa região e só depois ocorria a fissuração vertical (Figura 3). Tal comportamento evidenciou a boa capacidade da argamassa plástica em absorver as deformações, conforme demonstraram NASCIMENTO & HELENE (1993). Na Tabela 7, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização da argamassa de assentamento dos minipainéis.

Nas Figuras 4 e 5, apresentam-se as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, respectivamente, para as misturas T3 (solo arenoso + 10% de cimento) e T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio), aos 91 dias. Percebe-se, pelas imagens, o efeito do silicato de sódio no que diz respeito ao aspecto geral da estrutura cristalina das amostras analisadas.

TABELA 5. Massa específica aparente e velocidade da onda ultra-sônica.

Trat.		Massa Específica Aparente (kg m ⁻³)		
		28 dias*	56 dias	91 dias
SOLO ARENOSO	T1	1870,62 ± 24,82 (1,33)	1866,86 ± 91,29 (4,89)	1777,88 ± 14,40 (0,81)
	T2	1897,23 ± 8,54 (0,45)	1832,82 ± 5,49 (0,30)	1776,89 ± 27,29 (1,54)
	T3	1898,41 ± 17,09 (0,90)	1857,45 ± 12,88 (0,69)	1815,48 ± 5,24 (0,29)
	T4	1859,80 ± 17,78 (0,96)	1847,75 ± 4,04 (0,22)	1831,94 ± 19,75 (1,08)
	T5	1887,37 ± 8,35 (0,44)	1869,01 ± 6,81 (0,36)	1866,75 ± 4,30 (0,23)
	T6	1870,56 ± 0,00 (0,00)	1838,25 ± 8,57 (0,47)	1797,44 ± 8,77 (0,49)
	T7	1906,53 ± 11,86 (0,62)	1887,13 ± 8,23 (0,44)	1848,64 ± 10,32 (0,56)
	T8	1877,47 ± 11,65 (0,62)	1877,55 ± 14,72 (0,78)	1869,42 ± 4,58 (0,25)
	T9	1922,32 ± 9,48 (0,49)	1933,74 ± 14,30 (0,74)	1908,24 ± 4,36 (0,23)
SOLO SILTOSO	T10	1855,40 ± 15,94 (0,86)	1829,46 ± 12,71 (0,69)	1769,07 ± 86,58 (4,89)
	T11	1874,70 ± 12,74 (0,68)	1829,47 ± 8,63 (0,47)	1743,49 ± 10,16 (0,58)
	T12	1852,97 ± 37,49 (2,02)	1862,54 ± 25,30 (1,36)	1766,55 ± 17,46 (0,99)
	T13	1795,93 ± 28,72 (1,60)	1806,28 ± 9,76 (0,54)	1758,79 ± 13,55 (0,77)
	T14	1856,85 ± 11,94 (0,64)	1832,25 ± 17,91 (0,98)	1782,48 ± 9,20 (0,52)
	T15	1808,01 ± 10,92 (0,60)	1777,22 ± 12,17 (0,68)	1712,76 ± 9,10 (0,53)
	T16	1815,50 ± 28,89 (1,59)	1759,48 ± 7,53 (0,43)	1711,80 ± 24,55 (1,43)
	T17	1798,71 ± 13,44 (0,75)	1792,63 ± 10,08 (0,56)	1772,62 ± 22,15 (1,25)
	T18	1807,38 ± 0,47 (0,03)	1793,24 ± 7,17 (0,40)	1760,95 ± 41,70 (2,37)
Velocidade (m s ⁻¹)				
SOLO ARENOSO	T1	1185,20 ± 21,11 (1,78)	1164,92 ± 14,85 (1,27)	1235,83 ± 13,15 (1,06)
	T2	1338,80 ± 0,00 (0,00)	1243,15 ± 6,66 (0,54)	1377,65 ± 39,67 (2,88)
	T3	1485,17 ± 23,78 (1,60)	1620,38 ± 15,75 (0,97)	1715,44 ± 24,30 (1,42)
	T4	1784,44 ± 43,32 (2,43)	1976,32 ± 53,04 (2,68)	1950,97 ± 12,77 (0,65)
	T5	2120,78 ± 10,13 (0,48)	2307,14 ± 13,38 (0,58)	2357,17 ± 54,23 (2,30)
	T6	977,87 ± 0,00 (0,00)	1290,52 ± 21,76 (1,69)	1270,00 ± 56,72 (4,47)
	T7	1432,12 ± 15,10 (1,05)	1510,72 ± 15,17 (1,00)	1677,93 ± 20,76 (1,24)
	T8	1333,91 ± 7,89 (0,59)	1984,43 ± 210,60 (10,60)	2215,81 ± 21,67 (0,98)
	T9	2310,61 ± 19,10 (0,83)	2395,53 ± 32,36 (1,35)	2423,20 ± 36,13 (1,49)
SOLO SILTOSO	T10	1060,92 ± 36,98 (3,49)	1118,32 ± 48,02 (4,29)	1140,67 ± 41,72 (3,66)
	T11	1172,82 ± 53,88 (4,59)	1217,57 ± 16,49 (1,35)	1140,33 ± 3,07 (0,27)
	T12	1229,82 ± 17,71 (1,44)	1260,85 ± 33,21 (2,63)	1298,95 ± 18,30 (1,41)
	T13	929,80 ± 41,40 (4,45)	1081,79 ± 17,57 (1,62)	1395,67 ± 24,14 (1,73)
	T14	1161,07 ± 46,35 (3,99)	1447,17 ± 21,27 (1,47)	1260,34 ± 55,93 (4,44)
	T15	1145,45 ± 20,09 (1,75)	1102,05 ± 16,73 (1,52)	1041,28 ± 17,60 (1,69)
	T16	1281,29 ± 29,97 (2,34)	1169,88 ± 35,95 (3,07)	1102,17 ± 26,17 (2,37)
	T17	1044,71 ± 27,34 (2,62)	1040,81 ± 4,20 (0,40)	1032,44 ± 8,24 (0,80)
	T18	1310,68 ± 66,95 (5,11)	1278,45 ± 5,37 (0,42)	1163,87 ± 92,06 (7,91)

*Valores médios ± desvio-padrão (coeficiente de variação).

TABELA 6. Módulo de elasticidade dinâmico dos minipainéis.

Tratam.	28 dias*			56 dias			91 dias		
SOLO ARENOSO	T ₁	2628,32 ± 93,13	(3,54) ghi A	2533,07 ± 102,03	(4,03) gh A	2715,42 ± 49,74	(1,83) efghi A		
	T ₂	3400,56 ± 12,49	(0,37) def A	2832,50 ± 24,15	(0,85) fgh A	3372,77 ± 152,72	(4,53) ef A		
	T ₃	4188,60 ± 142,48	(3,40) d B	4877,79 ± 113,82	(2,33) d A	5343,63 ± 153,64	(2,88) d A		
	T ₄	5923,29 ± 243,13	(4,10) c B	7222,80 ± 398,85	(5,47) c A	6972,92 ± 92,98	(1,33) c A		
	T ₅	8488,82 ± 60,69	(0,71) b B	9949,22 ± 143,99	(1,45) b A	10377,45 ± 478,23	(4,61) a A		
	T ₆	1788,67 ± 0,00	(0,00) ij B	3062,66 ± 112,03	(3,66) fg A	2905,33 ± 268,68	(9,25) efgh A		
	T ₇	3910,62 ± 82,77	(2,12) de B	4307,07 ± 71,43	(1,66) de B	5205,00 ± 105,28	(2,02) d A		
	T ₈	3340,90 ± 54,94	(1,64) def C	7485,28 ± 1665,79	(22,25) c B	9179,06 ± 161,63	(1,76) b A		
	T ₉	10264,40 ± 205,08	(2,00) a B	11100,46 ± 359,08	(3,23) a A	11207,94 ± 351,16	(3,13) a A		
SOLO SILTOSO	T ₁₀	2091,33 ± 152,16	(7,28) ghij A	2291,84 ± 189,57	(8,27) gh A	2299,25 ± 104,15	(4,53) g hi A		
	T ₁₁	2582,90 ± 221,44	(8,57) fghi A	2712,57 ± 71,84	(2,65) gh A	2267,13 ± 9,72	(0,43) ghi A		
	T ₁₂	2835,73 ± 72,85	(2,57) fgh A	2961,80 ± 134,63	(4,55) fgh A	2980,84 ± 71,06	(2,38) efg A		
	T ₁₃	1554,21 ± 123,23	(7,93) j B	2114,71 ± 77,63	(3,67) gh B	3426,39 ± 103,25	(3,01) e A		
	T ₁₄	2508,15 ± 215,05	(8,57) fghij B	3838,79 ± 137,43	(3,58) ef A	2838,02 ± 263,07	(9,27) efghi B		
	T ₁₅	2372,70 ± 76,81	(3,24) fghij A	2158,78 ± 60,53	(2,80) gh A	1857,38 ± 55,65	(3,00) i A		
	T ₁₆	2981,20 ± 123,56	(4,14) efgh A	2410,45 ± 150,43	(6,24) gh AB	2081,19 ± 113,65	(5,46) ghi B		
	T ₁₇	1964,97 ± 111,08	(5,65) hij A	1942,05 ± 24,60	(1,27) h A	1889,93 ± 49,69	(2,63) hi A		
	T ₁₈	3112,96 ± 311,62	(10,01) fg A	2931,01 ± 28,24	(0,96) fgh AB	2393,46 ± 337,40	(14,10) fghi B		

*Valores médios ± desvio-padrão (coeficiente de variação). Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



FIGURA 3. Fissuras verticais e horizontais nos minipainéis após a ruptura.

TABELA 7. Resultados dos ensaios de caracterização da argamassa de assentamento.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Simples (MPa)*	Massa Específica Aparente (kg m^{-3})*	Velocidade da Onda Ultra-Sônica (m s^{-1})*	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)*
14	2,39 ± 0,13 (5,63)	1929,38 ± 79,59 (4,13)	2076,55 ± 29,82 (1,44)	8313,81 ± 105,93 (1,27)
42	4,86 ± 0,24 (4,96)	1724,52 ± 22,11 (1,28)	2330,93 ± 64,23 (2,76)	9375,78 ± 510,75 (5,45)
77	6,64 ± 0,33 (4,93)	1789,46 ± 72,57 (4,06)	2434,38 ± 56,51 (2,32)	10619,86 ± 762,76 (7,18)

*Valores médios ± desvio-padrão (coeficiente de variação)

Como já relatado, os silicatos de cálcio hidratados são agentes cimentantes e melhoram a estabilidade do solo, preenchendo seus vazios e expulsando, conseqüentemente, a água do solo. Na Figura 5, nota-se menor quantidade de espaços vazios e concavidades, o que evidencia maior formação

de silicatos de cálcio hidratados e resulta uma estrutura cristalina de melhor qualidade. Os principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) foram o Al, Si, Ca e Fe para ambas as misturas.

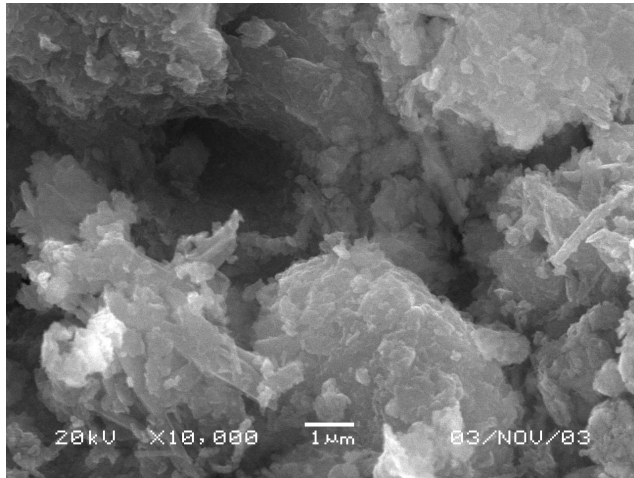


FIGURA 4. Imagem por microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10.000 vezes, para a mistura sem silicato de sódio (T3), aos 91 dias.

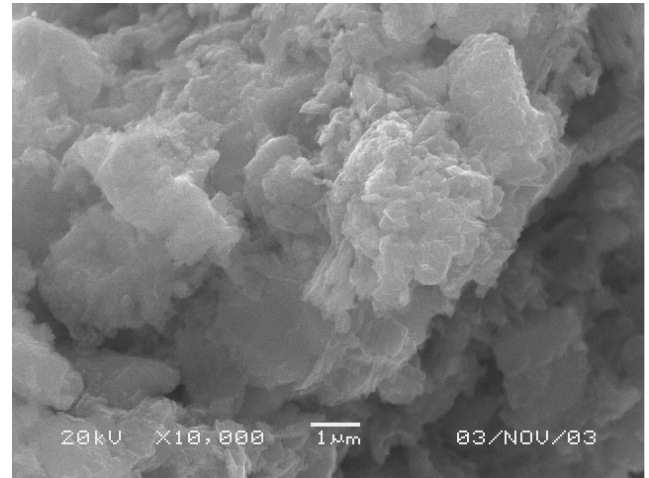


FIGURA 5. Imagem por microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10.000 vezes, para a mistura com silicato de sódio (T5), aos 91 dias.

CONCLUSÕES

O silicato de sódio afetou fortemente o comportamento mecânico de ambos os solos, promovendo ganhos consideráveis em sua resistência à compressão simples. Independentemente do tipo de solo estudado, as adições associadas ao silicato de sódio produziram os melhores resultados em termos de resistência à compressão simples. Em termos de absorção de água, somente os tratamentos adicionados ao solo arenoso atenderam às especificações técnicas.

Os maiores valores de resistência à compressão simples foram obtidos aos 91 dias pelos mini-painéis arenosos com os teores de 10% de cimento e cal associados ao silicato de sódio. Esses mesmos tratamentos conferiram os maiores valores do módulo de elasticidade dinâmico.

A argamassa plástica usada no assentamento dos tijolos mostrou-se capaz de absorver as deformações impostas durante os ensaios de compressão simples.

Os solos com características semelhantes ao do arenoso estudado, tratados com cimento ou cal associados ou não ao silicato de sódio, mostram-se promissores no atendimento às demandas por tecnologias apropriadas com vistas à racionalização e otimização do uso da terra como material de construção, redução de custos e do uso de energia.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, M.A.M.; LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; COSTA, L.M. Estabilização química dos solos em estradas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. *Resumos...* Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. p.158.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. *ASTM C-1388*. Standard Test Method for Compressive Strength of Laboratory Constructed Masonry Prisms, 1997. 3 p.

AMORIM, L.A.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. Estabilização de solos vermelhos tropicais com cales pozolânicas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1996. v.1, p.301-27.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 06459*. Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b. 6 p.

_____. *NBR 07175*. Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 1992a. 3 p.

_____. *NBR 07180*. Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c. 3 p.

_____. *NBR 07181*. Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a. 13 p.

_____. *NBR 07182*. Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

_____. *NBR 07215*. Cimento Portland: determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1991b. 7 p.

_____. *NBR 07251*. Agregado em estado solto: determinação da massa específica unitária. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

_____. *NBR 08491*. Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1992b. 8 p.

_____. *NBR 08492*. Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1992c. 8 p.

_____. *NBR 10832*. Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1989. 8 p.

_____. *NBR 11578*. Cimento Portland CPIIE32. Rio de Janeiro, 1991a. 5 p.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA O.; NECHAR, M.; ROMERO, R.; BAGUR, M.R. Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality. *Ceramics International*, Amsterdam, v.27, n.4, p.401-6, 2001.

FREIDIN, K.; ERELL, E. Bricks made of coal fly-ash and slag, cured in the open air. *Cement and Concrete Composites*, Oxford, v.17, n.4, p.289-300, 1995.

FREIRE, W.J. *Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento*. 1976. 142 f. Doutorado (Doutorado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976.

FERREIRA, G.C.S.; MORENO JR., A.L. Estudo comparativo do comportamento à compressão e à flexão de pequenos painéis de alvenaria de solo-cimento executados com argamassa de assentamento usual e argamassas de solo-cimento. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28., 1997, São Carlos. *Anais...* Mendoza: Associação Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 1997. 1 CD-ROM.

HAMASSAKI, L.T. Aspectos da aplicabilidade do ensaio do ultra-som em concreto. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1987. 17 p. (Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil, 17)

NASCIMENTO, A.A.P.; HELENE, P.E. *Estudos de fissuração em paredes de solo-cimento destinadas a edificações habitacionais*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1993. 26 p. (Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil, 108)

QASRAWI, H.Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply e reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, Oxford, v.30, n.5, p.739-46, 2000.

REN, K.B.; KAGI, D.A. Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. *Building and Environmental*, Oxford, v.30, n.3, p.433-40, 1995.

ROLIM, M.M.; FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos de prova, tijolos e painéis de solo cimento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.1, p.93-8, 1999.

RUFF, C.G.; DAVIDSON, D.T. Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. *Highway Research Board Bulletin*, Washington, v.304, n.1, p.76-92, 1961.

SHERWOOD, P.T. *Soil stabilization with cement and lime: state of the art review*. London: HMSO, 1993. 153 p.